流体機械工学演習

前 田 照 行 著

流体機械工学演習

前田昭行著

江苏工业学院图书馆
藏书章

学献社

著者紹介：——
前田照行（まえだ てるゆき）
昭和33年　千葉大学工学部機械工学科卒業
昭和40年　東京大学大学院博士課程修了
現　在　成蹊大学 教授　工学博士
住　所　東京都東大和市湖畔 2-1074-71

流体機械工学演習

Exercise of Hydraulic Machinery

定価は箱に表示してあります

1980年10月17日　初版印刷
1980年10月27日　初版発行

© 著者　前田照行

発行者　横井川　彰

東京都文京区小石川3丁目1番3号（伝通院ビル内）〒112

発行所　株式会社　学献社

振替 東京 3-13152　電話 03(813)7362-3〔営業部〕 03(814)2939〔編集部〕

印刷　科学図書印刷；製本　染野製本

はしがき

流体機械には，ポンプや水車で代表される水力機械，送風機や圧縮機で代表される空気機械および油を媒体とする油圧機械や流体伝動装置などがあるが，その種類は多種多様である．油圧機械は比較的新らしい分野であって，この分野を含めた演習書は少ないようである．

本書は大学，短大，工業高等専門学校等における講義の理解を深めるためのわかり易い演習書にしたいと執筆に心がけた．したがって，各節の基礎となる部分に多くの例題を掲げ，それを考えながら習得し，その応用までも問題を通して身につくように構成したつもりである．本書は，流体機械の演習書であるにもかかわらず，第1章で水力学に関する一般的な理論にふれているのは，流体機械で使用される理解を助ける目的と同時に，水力学の演習書の代りにしようと試みたからである．

流体機械の一分野を専攻している浅学非才の筆者のことゆえ，表現の曖昧さや，誤りを恐れるが，この点読者諸氏のご注意をお願いする次第である．

本書を著わす機会を与えて下さった成蹊大学教授槌田昭先生と学献社の横井川氏に深く謝意を表する次第である．

1980年8月

著　　者

目　　　　次

等1章　水力学の基礎

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

第2章 ターボ式流体機械

第3章　容積形流体機械

第4章　油　圧　機　械

第5章 流体伝動装置

第1章　水力学の基礎

1·1　単　　　位

力学で使用される単位には，**CGS 単位系**と**重力単位系**がある．前者の基本単位は長さ：センチメートル，質量：グラム，時間：秒の3つを，後者は長さ：メートル，力：キログラム，時間：秒の3つからなる．しかし，わが国においても**国際単位系**（SI 単位）の採用が決まり，将来はその使用が推進されると思う．しかし，本書では慣例に従って重力単位を用いるが，参考のために第1·1表に各単位系の対照表をつけておく．

第1·1表　各単位系の対照表（太字が基本単位）

	CGS系	重　力　系	SI系
長　さ　(L)	**cm**	**m**	**m**
質　量　(M)	**g**（グラム）	kgf·s²/m	**kg**
時　間　(T)	**s**	**s**	**s**
力　(F)	dyn	**kgf**	N（ニュートン）
加速度　(α)	Gal（ガル）	m/s²	m/s²
圧　力　(P)	dyn/cm²	kgf/m²	Pa（パスカル）
エネルギ　(E)	erg	kgf·m	J

標準の重力加速度〔g〕=9.80665〔m/s²〕，〔Gal〕=1〔cm/s²〕，Pa=〔N/m²〕，1〔Joule〕=10⁷〔erg〕

（1）　力（force）

重力単位：1〔kgf〕＝重力の加速度〔g〕が質量1〔kg〕の物体に作用したときの力

国際単位：1〔N〕＝質量1〔kg〕の物体に加速度1〔m/s²〕を与えるに必要な力＝1〔kg〕×1〔m/s²〕＝1〔kgm/s²〕

【注】質量〔kg〕と力〔kg〕は間違いやすいので，工学上では力をキログラム重（〔kgf〕または〔kgw〕）と表わす場合がある．

(2)　**質量** (mass)

$$\text{質量}\ (M)=\frac{\text{重量}}{\text{重力の加速度}}\left[\frac{\mathrm{kgf}}{\mathrm{m/s^2}}\right]=\left[\frac{\mathrm{kgf\cdot s^2}}{\mathrm{m}}\right]$$

(3)　**密度** (density)

$$\text{密度}\ (\rho)=\frac{\text{質量}}{\text{単位体積}}\left[\frac{\mathrm{kgf\cdot s^2}}{\mathrm{m^4}}\right]$$

(4)　**比重量** (specific weight)

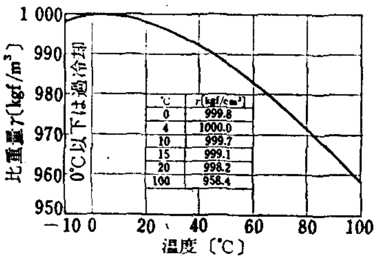
$$\text{比重量}\ (\gamma=\rho g)=\frac{\text{重量}}{\text{単位体積}}\left[\frac{\mathrm{kgf}}{\mathrm{m^3}}\right]$$

(5)　**圧力** (pressure)

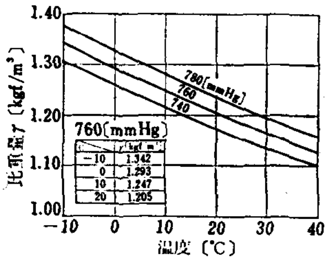
$$\text{圧力}\ (p)=\frac{\text{力}}{\text{単位面積}}\left[\frac{\mathrm{kgf}}{\mathrm{m^2}}\right]$$

1・2　流体の物性値

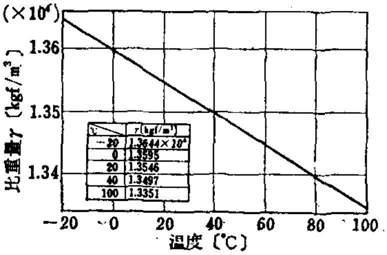
(a)　**比重量**　水，空気および水銀の比重量を第 1・1～3 図に示す．また，第1・2表には油の比重量を示している．



第1・1図　水の比重量（標準大気圧 1.0332〔kgf/cm²〕）



第1・2図　乾燥空気の比重量



第1・3図　水銀の比重量

第1・2表　油の比重量

	γ〔kgf/m³〕(15〔℃〕)
ディーゼル油	857
スピンドル油	912
マシン油	911
シリンダ油	969

【例題 1·1】 水銀の比重が13.56であるとき，水銀の比重量，比容積および密度を求めよ。

【解】 ある物質の比重 S と比重量 γ との間には，水の比重量 γ_W (4℃, 1気圧) との間に，

$$S=\gamma/\gamma_W$$

の関係がある．したがって：

$$\gamma_{Hg}=S_{Hg}\gamma_W=13.56\times(1.00\times10^3)\ [\mathrm{kgf/m^3}]=1.356\times10^4\ [\mathrm{kgf/m^3}]$$

$$v_{Hg}=\frac{1}{\gamma_{Hg}}=7.375\times10^{-5}\ [\mathrm{m^3/kgf}]$$

$$\rho_{Hg}=\frac{\gamma_{Hg}}{g}=\frac{1.356\times10^4\ [\mathrm{kgf/m^3}]}{9.81\ [\mathrm{m/s^2}]}=1.382\times10^3\ [\mathrm{kgfs^2/m^4}]$$

【例題 1·2】 乾燥空気の比重量は，次のように表わされることを示せ．

$$\gamma=0.464\frac{H}{T}$$

ただし，H＝水銀柱の高さ〔mm〕，T＝絶対温度，$\gamma_0=1.293$〔kgf/m³〕(0〔℃〕の値)

【解】 気体の状態方程式 $P/\gamma=RT$ より，$P_0/\gamma_0=RT_0$ と $P/\gamma=RT$ の比をとると，

$$\left.\begin{aligned}\gamma&=\gamma_0\frac{T_0}{T}\frac{p}{p_0}=1.293\times\frac{273}{273+t}\times\frac{H}{760}\ [\mathrm{kgf/m^3}]\\&=0.464\frac{H}{T}\ [\mathrm{kgf/m^3}]\end{aligned}\right\}\tag{1·1}$$

（b） **圧縮率**（体積弾性係数）　体積 V_0，圧力 P_0 の流体を圧縮して体積が $V_0-\varDelta V$，圧力が $P_0+\varDelta P$ になったとする．このとき，

$$\beta=\frac{-\dfrac{\varDelta V}{V_0}}{\varDelta p}\ [\mathrm{m^2/kgf}]\tag{1·2}$$

によって定義される量 β を**圧縮率** (compressibility) という．β の逆数

$$K=1/\beta\ [\mathrm{kgf/m^2}]\tag{1·3}$$

を**体積弾性係数** (bulk modulus) という．第1·3表に液体の体積弾性係数を示す．

第1·3表　液体の体積弾性係数

	温度〔℃〕	圧力〔kgf/cm²〕	K〔kgf/m²〕
水	20	1～25	2.11×10^8
石油	20	1	1.90×10^8
エチルアルコール	14	9～38	0.99×10^8
水銀	20	1～100	2.54×10^9

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

【例題 1·3】 圧力を加えることによって体積を1〔%〕減少させたい．どれだけの圧力を加えればよいか．ただし，水の体積弾性係数は $K=2.11\times10^8$〔kgf/m²〕とする．

【解】 圧縮率の定義式(1·2)より，圧力の増加量 ΔP は，

$$\Delta p=-\frac{\Delta V}{V_0}\cdot\frac{1}{\beta}=-\frac{\Delta V}{V_0}K=-\left(-\frac{1}{100}\right)\times2.11\times10^8\ \text{〔kgf/m}^2\text{〕}$$
$$=2.11\times10^6\ \text{〔kgf/m}^2\text{〕}=2.11\times10^2\ \text{〔kgf/cm}^2\text{〕}$$

（c） **表面張力**　液体の自由表面は，液体の内部の分子の引力によって常に縮もうとする．この力を**表面張力**(surface tension)という．

表面張力の大きさ σ は，液面上に引かれた任意の曲線の線分 Δs に作用する力を ΔF とすると，

$$\sigma=\frac{\Delta F}{\Delta s}\ \text{〔kgf/m〕}$$

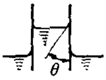
で表わされる．σ の値は，液体が接する相手の種類と温度によって異なる

第1·4表に各種液体の表面張力の値を示し，第1·5表には液体と固体壁間の接触角度を示す．

第1·4表　液体の表面張力（20〔℃〕）

液　体	接する相手	σ〔kgf/m〕
エチルアルコール	空　気	0.228×10^{-2}
オリーブ油	〃	0.320×10^{-2}
水	〃	0.740×10^{-2}
10〔%〕食塩水	〃	0.754×10^{-2}
水　銀	〃	4.76×10^{-2}
水　銀	水	3.73×10^{-2}

第1·5表　液体とガラス間の接触角



種　類	エチルアルコール	ベンゾール	水	水　銀
接触角〔θ°〕	0	0	8～9	130～150

【例題 1·4】 直交する曲率半径がそれぞれ r_1，r_2 である液面の内外の圧力差 ΔP を求めよ．

【解】 液面は表面張力のために常に収縮しようとする結果，液面の内部は外部より圧力が高くなる．

いま，第1·4図において液面の微小面積 $dS_1\cdot dS_2$ に働く力の法線方向の釣合いを考えると，

$$\Delta p\cdot dS_1\cdot dS_2=2\left\{\left(\sigma\sin\frac{\theta'}{2}\right)dS_1+\left(\sigma\sin\frac{\theta}{2}\right)dS_2\right\}\fallingdotseq2\,\sigma\left(\frac{\theta'}{2}dS_1+\frac{\theta}{2}dS_2\right)$$

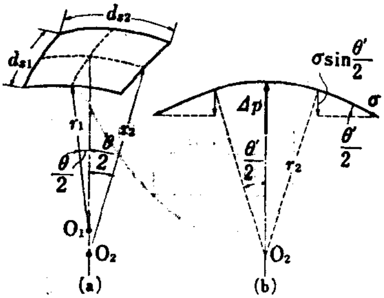
ここで，$dS_1=r_1\theta$，$dS_2=r_2\theta'$ であるので，上式より θ，θ' を消去すると，

$$\Delta p=\sigma\left(\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r_2}\right) \tag{1·4}$$

となる．液面が球の場合は，$r_1=r_2=r$ であるので，

$$\Delta p=\frac{2\sigma}{r} \tag{1·5}$$

となる．



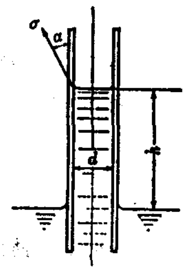
第1·4図　液面の微小要素

【例題 1·5】 水中に内直径 $d=0.1$〔mm〕のガラス管を立てた．水はどのくらい上昇するか．ただし，接触角 $\alpha=9$〔°〕，表面張力 $\sigma=0.740\times10^{-2}$〔kgf/m〕とする．

【解】 第1·5図のように表面張力によって管内に吸い上げられた水柱の重量と表面張力の垂直成分が釣り合っているので，

$$\pi d(\sigma\cos\alpha)=\gamma(\pi d^2/4)h$$

$$\therefore\quad h=\frac{4\sigma\cos\alpha}{\gamma d} \tag{1·6}$$



第1·5図　毛管現象

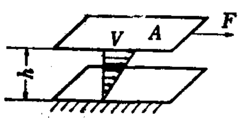
したがって，

$$h=\frac{4\times0.740\times10^{-2}\,[\mathrm{kgf/m}]\times0.988}{10^3\,[\mathrm{kgf/m^3}]\times0.1\times10^{-3}\,[\mathrm{m}]}=2.92\times10^{-1}\,[\mathrm{m}]=29.2\,[\mathrm{cm}]$$

このように細管中を液体が上昇（または下降）する現象を**毛管現象**(capirally phenomena)という．

（d） 粘　　度　実在の流体では隣合う層の間に相対運動があれば抵抗を生じる．流体のこの性質を**粘性**(viscosity)という．

第1·6図のように，平行2平板の間に流体が満たされている場合，一方を固定し，他方を速度 V で動かすに必要な力 F は，板の面積を A，2平板間のすきまを h とすると，$F\propto(AV/h)$ で表わされる．この比例定数を μ とすると，

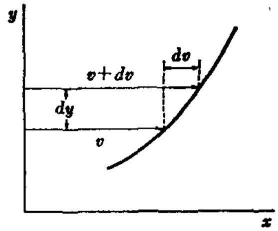


第1·6図　流体が満たされた平行2平板

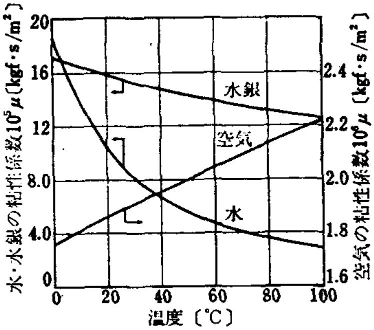
$$F=\mu\frac{AV}{h}\quad あるいは\quad \frac{F}{A}\tau=\mu\frac{V}{h} \tag{1·7}$$

と表わされる．μ を**粘度**あるいは**粘性係数**(coefficient of viscosity)という．

速度こう配 V/h が直線でない場合は，第1·7図に示すように微小すきま dy の速度差 dv をとり，次のように表わされる．



第1·7図　速度分布が曲線である場合



第1·8図　水・水銀および空気の粘性係数

$$\tau=\mu\frac{dv}{dy} \tag{1·7}$$

第1·8図は水・水銀および空気の粘性係数を温度に対してプロットしたものである．図からわかるように，液体は温度の上昇に対して粘性係数が低下するのに対して，気体は上昇することがわかる．この理由は1·7節で説明する．

$\nu=\mu/\rho$ を**動粘度**または**動粘性係数**(coefficient of kinematic viscosity)という．

（i）　粘性係数の次元

$$[\mu]=\left[\frac{F\cdot h}{A\cdot V}\right]=\left[\frac{F\cdot L}{L^2(L/T)}\right]=[FL^{-2}T] \tag{1·8}$$

$$[\nu]=\left[\frac{\mu}{\rho}\right]=\left[\frac{\mu}{\gamma/g}\right]=\left[\frac{FL^{-2}T}{FL^{-3}(LT^{-2})^{-1}}\right]=[L^2T^{-1}] \tag{1·9}$$

（ii）　粘性係数の単位

μ : 1〔dyne·s/cm²〕= 1 ポアズ (Poise)，1/100 ポアズ = 1〔cP〕（センチポアズ）

ν : 1〔cm²/s〕= 1 ストークス(stokes)，1/100 ストークス = 1〔cSt〕（センチストークス）

【例題 1·6】　油の動粘度が 40〔cSt〕で比重が 0.87 である．粘性係数を重力単位と CGS 単位で表わせ．

【解】

$$\mu=\rho\nu=\frac{\gamma}{g}\nu=\frac{S\gamma_{H_2O}}{g}\nu=\frac{0.87\times10^{-3}\,[\mathrm{kgf/cm^3}]\times40\times10^{-2}\,[\mathrm{cm^2/s}]}{980\,[\mathrm{cm/s^2}]}$$
$$=3.55\times10^{-7}\ [\mathrm{kgf\cdot s/cm^2}]$$

CGS 単位では，1 ポアズ = 1〔dyne·s/cm²〕であり，

$$1\,[\mathrm{kgf}]=10^3\,[\mathrm{gr}]\times 980\,[\mathrm{cm/s^2}]=0.98\times 10^6\,[\mathrm{gr\cdot cm/s^2}]=0.98\times 10^6\,[\mathrm{dyne}]$$

であるので，

$$\mu=(3.55\times 10^{-7})\times(0.98\times 10^6)\,[\mathrm{dyne\cdot s/cm^2}]=0.348\ [\text{ポアズ}]$$

となる．

〔演習問題 1·2〕

〔1〕 2 000〔l〕の油の重量が 1 740〔kgf〕であるとき，その比重量，比容積，密度を求めよ．

【解】 $\gamma=870\,[\mathrm{kgf/m^3}]$，$v=1.149\times 10^{-3}\,[\mathrm{m^3/kgf}]$，$\rho=88.8\,[\mathrm{kgf\cdot s^2/m^4}]$

〔2〕 750〔mmHg〕，20〔℃〕における乾燥空気の比重量を求めよ．

【解】 1.188〔$\mathrm{kgf/m^3}$〕

〔3〕 ある液体の圧力を 10〔$\mathrm{kgf/cm^2}$〕だけ高めたところ，その体積が 0.0526〔%〕だけ減じた．この液体の体積弾性係数を求めよ

【解】 $1.90\times 10^8\,[\mathrm{kgf/m^2}]$

〔4〕 気体の圧縮過程が $pv^n=$一定 によるものとするとき，気体の体積弾性係数を求めよ．

【解】 $K=nP$

〔5〕 断面積 A のピストンシリンダがある．ピストンシリンダに閉じ込められている圧力 p_0，容積 V_0 のガスを圧縮し，容積が V になったときのピストンシリンダのばね定数を求めよ．ただし，状態変化はポリトロープ変化をするものとする．

【解】 $A^2 n p_0 V_0^{\,n}/V^{n-1}$

〔6〕 直径 3〔mm〕の水滴（球）の中の圧力は大気圧よりどれだけ高いか．ただし，温度は 20〔℃〕とする．

【解】 9.87〔$\mathrm{kgf/m^2}$〕

〔7〕 十分に広い静止平板とすきま 1〔mm〕で向き合っている縦 30〔cm〕，横 50〔cm〕の平行平板の間にある液体が入っている．平板に平行に力 30〔gf〕を与えたら速度 2〔m/s〕で動いた．液体の粘性係数を求めよ．

【解】 $10^{-4}\,[\mathrm{kgf\cdot s/m^2}]$

1·3 圧　力

1·3·1 静水圧 面に垂直に作用する単位面積あたりの力を**圧力**(pressure)という．

$$p=F/A \ \text{〔kgf/m}^2\text{〕} \tag{1·10}$$

面において圧力が変化している場合は，任意の点の圧力は次のように表わされる．

$$P=\lim_{\Delta A\to 0}\frac{\Delta F}{\Delta A}=\frac{dF}{dA} \ \text{〔kgf/m}^2\text{〕} \tag{1·11}$$

（a） **パスカルの原理** 静止流体内の任意の点の圧力は各方向に等しく作用する．

【例題 1·7】 パスカルの原理を証明せよ．

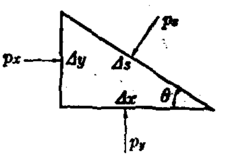
【解】 第1·9図に示すように，流体中に厚さ1の微小三角形を考える．流体は静止しているので，三角形要素に作用する力は釣り合っている．したがって，

x 方向：$p_x\Delta y-(p_s\Delta s)\sin\theta=0$

y 方向：$p_y\Delta x-(p_s\Delta s)\cos\theta=0$

一方，図より，$\Delta y=\Delta s\sin\theta$，$\Delta x=\Delta s\cos\theta$ であるので，

$p_s=p_x=p_y$



第1·9図 流体中の微小三角形に作用する圧力

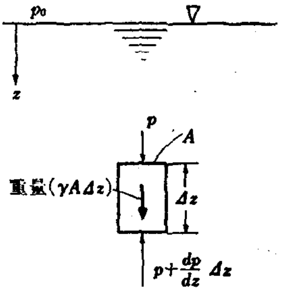
となる．すなわち，任意の点の圧力はすべての方向に等しく作用する．

（b） **圧力と水頭** 圧力を水の深さ（高さ）に換算した量を**水頭**(head)という．

比重量 γ の液体の深さ z の点の圧力を求めるため，第1·10図に示すような微小円柱の釣合いを考える．

$$pA-\left(p+\frac{dP}{dz}\Delta z\right)A+\gamma(A\Delta z)=0$$

$$\therefore\quad dp/dz=\gamma \tag{1·12}$$



第1·10図 流体中の微小流体に作用する力

となる．上式は流体の圧力と深さの関係を表わす基礎式である．

上式を積分し，$z=0$：$p=p_0$ とおくと，

$$p=p_0+\gamma z \tag{1·13}$$

ここで，圧力 p_0 を基準にとれば（$p_0=0$），

$$p=\gamma z$$

と表わされる．

（c）圧力の単位と表示法

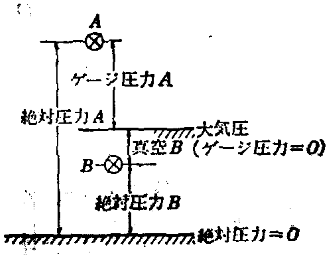
標準圧力　1〔atm〕=760〔mmHg〕（0〔℃〕，$g=9.80665$〔m/s²〕）

=1.0332〔kgf/cm²〕（=13.595×10⁻³〔kgf/cm³〕×76〔cm〕）

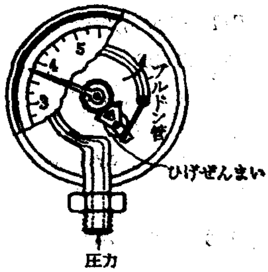
=14.7〔lb/in², psi〕

工学圧力　1〔気圧〕=1〔kgf/cm²〕

=735.5〔mmHg〕（0〔℃〕）



第1·11図　圧力の表示法

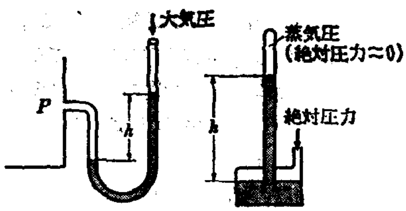


第1·12図　ブルドン管圧力計

=14.22〔lb/in², psi〕

圧力の表示法 ｛① 絶対圧力（absolute pressure）
② ゲージ圧力（gauge pressure）=（絶対圧力）−（大気圧）

第1·11図は各種圧力の関係を図示したものである．第1·12図は機械的な圧力測定方法であり，第1·13図は液体による圧力測定方法の一例である．



（a）ゲージ圧力　（b）絶体圧力

第1·13図　液体による圧力測定法

【例題 1·8】 地上 z の点の圧力および温度を求めよ．ただし，空気の比重量を γ とする．

【解】 空気の状態はポリトロープ変化をすると仮定すると，

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com